

文章编号: 1000-4750(2001)04-051-09

钢构件在循环大应变作用下的有限元分析

苏明周, 顾 强, 申 林

(西安建筑科技大学土木工程学院, 西安 710055)

摘 要: 采用混合强化本构关系、剪切厚壳单元及 U.L.方法对钢构件循环加载进行了有限元分析, 并编制了相应的计算程序, 用于模拟地震作用下钢构件的滞回性能。通过与其它分析方法及试验的分析比较, 证明了该程序具有较高的精度, 适用于板、壳及组合体的强度和稳定及循环加载问题的分析。

关键词: 混合强化; 循环荷载; 双重非线性壳单元

中图分类号: TU392.1 **文献标识码:** A

1 引言

随着经济的增长和结构形式的发展, 钢结构在建筑中的应用越来越普遍, 由于人们对钢结构在地震作用下的性能认识不足, 现有的设计方法难以避免震害的发生, 需要对此进行进一步的研究。采用试验研究手段耗资巨大, 目前的分析计算往往是针对某一特殊问题, 且过于简化。因此, 急需一种高精度的、行之有效的一般分析方法。

本文采用 8 节点 40 自由度的厚壳单元(这种单元可以用来计算薄板和薄壳)、U.L.方法, 结合混合强化本构关系, 编制了相应的有限元计算程序, 适用于板、壳及其组合体的强度和稳定及循环加载问题的分析。

2 双重非线性有限元的理论基础

2.1 单元特性和刚度矩阵

对于八节点壳单元, 假定其法线变形后仍为直线, 但不再垂直于中面。详细的单元特性及矩阵分析可参考文献[1,2], 这里仅作简要介绍。

位移模式:

$$\{u\} = [N]\{u\}^e = \sum_{k=1}^8 [N]^{(k)} \{u\}^{(k)} \quad (1)$$

考虑大变形时, 本构关系中要用到 Cauchy 应力, 故几何非线性分析采用 U.L.方法, Green 应变为

收稿日期: 1999-12-16; 修改日期: 2000-03-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59678030)

作者简介: 苏明周(1971), 男, 西安市人, 讲师, 工学博士, 从事钢结构动力与稳定方面的研究

$${}^t E_y = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

将其分解为线性和非线性两部分，写成矩阵形式

$$\{ {}^t E^L \} = [{}^t B_L] \{ u \}^{(e)} \quad (3)$$

$$\{ {}^t E^N \} = [{}^t B_N^*] \{ u \}^{(e)} = \frac{1}{2} [{}^t A] [G] \{ u \}^{(e)}$$

对于 U.L. 方法，静力问题的虚功方程为

$$\int_V (\sigma_y + \Delta S_y) \delta {}^t E_y dV = R^{t+\Delta} \quad (4)$$

式中

$$R^{t+\Delta} = \int_V ({}^t P + \Delta P) \delta u dV - \int_V ({}^t q + \Delta q) \delta u dS$$

为简化起见，略去高阶项，写成矩阵形式

$$({}^t K_0)' + ({}^t K_\sigma)' \{ u \}^{(e)} = R^{t+\Delta} - \int_V [{}^t B_L]^T \{ \sigma \} dV \quad (5)$$

式中

$$[{}^t K_0]' = \int_V [{}^t B_L]^T [{}^t D] [{}^t B_L] dV ; \quad [{}^t K_\sigma]' = \int_V [{}^t G]^T [M] [{}^t G] dV$$

$$[M] = \begin{bmatrix} \sigma_{11} I & & & & \\ \sigma_{12} I & \sigma_{22} I & & & \\ \sigma_{31} I & \sigma_{23} I & \sigma_{33} I & & \end{bmatrix} ; \quad I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[{}^t B_L]^{(k)} = \begin{bmatrix} {}^t N_{k,x_1} & 0 & 0 & {}^t \phi_{11k} a_{k,x_1} & {}^t \phi_{12k} a_{k,x_1} \\ 0 & {}^t N_{k,x_2} & 0 & {}^t \phi_{21k} a_{k,x_2} & {}^t \phi_{22k} a_{k,x_2} \\ 0 & 0 & {}^t N_{k,x_3} & {}^t \phi_{31k} a_{k,x_3} & {}^t \phi_{32k} a_{k,x_3} \\ {}^t N_{k,x_2} & {}^t N_{k,x_1} & 0 & {}^t \phi_{11k} a_{k,x_2} + {}^t \phi_{21k} a_{k,x_1} & {}^t \phi_{12k} a_{k,x_2} + {}^t \phi_{22k} a_{k,x_1} \\ 0 & {}^t N_{k,x_2} & {}^t N_{k,x_1} & {}^t \phi_{21k} a_{k,x_2} + {}^t \phi_{31k} a_{k,x_1} & {}^t \phi_{22k} a_{k,x_2} + {}^t \phi_{32k} a_{k,x_1} \\ {}^t N_{k,x_2} & 0 & {}^t N_{k,x_1} & {}^t \phi_{31k} a_{k,x_2} + {}^t \phi_{11k} a_{k,x_1} & {}^t \phi_{32k} a_{k,x_2} + {}^t \phi_{12k} a_{k,x_1} \end{bmatrix}$$

$$[{}^t G]^{(k)} = \begin{bmatrix} {}^t N_{k,x_1} & 0 & 0 & {}^t \phi_{11k} a_{k,x_1} & {}^t \phi_{12k} a_{k,x_1} \\ 0 & {}^t N_{k,x_2} & 0 & {}^t \phi_{21k} a_{k,x_2} & {}^t \phi_{22k} a_{k,x_2} \\ 0 & 0 & {}^t N_{k,x_3} & {}^t \phi_{31k} a_{k,x_3} & {}^t \phi_{32k} a_{k,x_3} \\ {}^t N_{k,x_2} & 0 & 0 & {}^t \phi_{11k} a_{k,x_2} & {}^t \phi_{12k} a_{k,x_2} \\ 0 & {}^t N_{k,x_2} & 0 & {}^t \phi_{21k} a_{k,x_2} & {}^t \phi_{22k} a_{k,x_2} \\ 0 & 0 & {}^t N_{k,x_2} & {}^t \phi_{31k} a_{k,x_2} & {}^t \phi_{32k} a_{k,x_2} \\ {}^t N_{k,x_2} & 0 & 0 & {}^t \phi_{11k} a_{k,x_2} & {}^t \phi_{12k} a_{k,x_2} \\ 0 & {}^t N_{k,x_2} & 0 & {}^t \phi_{21k} a_{k,x_2} & {}^t \phi_{22k} a_{k,x_2} \\ 0 & 0 & {}^t N_{k,x_2} & {}^t \phi_{31k} a_{k,x_2} & {}^t \phi_{32k} a_{k,x_2} \end{bmatrix}$$

$$\{\sigma\} = \{\sigma_{11} \ \sigma_{22} \ \sigma_{33} \ \sigma_{12} \ \sigma_{23} \ \sigma_{31}\}^T$$

2.2 混合强化本构关系

本文采用混合强化本构关系描述钢材的特性, 通过混合强化参数 M ^[3] 将各向同性强化和随动强化结合起来, 屈服面既能膨胀(收缩)又能平移, 可考虑钢材的包辛格效应, 能较精确地描述三维大变形及低周循环加载情况, 当 M 取不同值时, 可退化到常用的其它模型。

基本假定为: (1) Von. Mises 材料; (2) 混合强化规则; (3) 壳单元假定 ($\sigma_x = 0$)。

考虑混合强化时的屈服面函数为

$$f = F(\sigma_y - \alpha_y) - h(\varepsilon_y^p) = \frac{3}{2} \bar{\sigma}'_y \bar{\sigma}'_y - \bar{\sigma}'^2(\bar{\varepsilon}_p) = 0 \quad (6)$$

将总应变线性地分解为

$$d\varepsilon_y^p = d\varepsilon_y^{p(n)} + d\varepsilon_y^{p(k)} \quad (7)$$

令

$$d\varepsilon_y^{p(n)} = M d\varepsilon_y^p \quad d\varepsilon_y^{p(k)} = (1 - M) d\varepsilon_y^p \quad (8)$$

式中 M 为混合强化材料参数, 取值范围为 $-1 < M \leq 1$, $M=0$ 时为随动强化, $M=1$ 时为各向同性强化, M 取其它值时为混合强化, M 可为负值, 表示屈服面收缩。

假定屈服面的移动方向只与随动强化有关, Prager^[4]认为

$$d\alpha_y = C d\lambda \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_y} \right)^{(k)} = C d\varepsilon_y^{p(k)} \quad (9)$$

结合虎克定律和一致条件, 推导出小应变下钢材的混合强化本构关系为

$$\{d\sigma\} = [D]_{\bullet} \{d\varepsilon\} \quad (10)$$

式中

$$[D]_{\bullet} = [D]_e - [D]_p \quad (11)$$

$$[D]_p = \frac{[D]_e \frac{\partial f}{\partial \{\sigma\}} \left(\frac{\partial f}{\partial \{\sigma\}} \right)^T [D]_e}{\left(\frac{\partial f}{\partial \{\sigma\}} \right)^T [D]_e \frac{\partial f}{\partial \{\sigma\}} + C(1 - M) \left(\frac{\partial f}{\partial \{\sigma\}} \right)^T \frac{\partial f}{\partial \{\sigma\}} + 2HM\bar{\sigma} \left[\frac{2}{3} \left(\frac{\partial f}{\partial \{\sigma\}} \right)^T \frac{\partial f}{\partial \{\sigma\}} \right]^{\frac{1}{2}}}$$

大应变下钢材的弹性应变远小于塑性应变, 总应变仍可线性地分解为弹性应变和塑性应变两部分。对于 U.L. 格式, 大应变的本构关系可通过下式求得

$$[D] = [D]_{\bullet} - [\tau_s] \quad (12)$$

式中 $[D]_{\bullet}$ 为小变形本构矩阵, 见式(11), $[\tau_s]$ 为柯西(Cauchy)应力矩阵, $C=2H/3$ 。

$$[\tau_{ij}] = \begin{bmatrix} 2\sigma_{11} & & & & & \\ & 2\sigma_{22} & & & & \\ \sigma_{12} & \sigma_{12} & \frac{1}{2}(\sigma_{11} + \sigma_{22}) & & & \\ & & & \frac{1}{2}\sigma_{13} & \frac{1}{2}\sigma_{23} & \\ 0 & \sigma_{23} & \frac{1}{2}\sigma_{13} & \frac{1}{2}\sigma_{23} & \frac{1}{2}\sigma_{11} & \\ \sigma_{13} & 0 & \frac{1}{2}\sigma_{23} & \frac{1}{2}\sigma_{13} & \frac{1}{2}\sigma_{12} & \frac{1}{2}\sigma_{11} \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} \text{对} \\ \\ \text{称} \\ \\ \\ \end{matrix} \quad (13)$$

2.3 强化参数 H 的确定

强化参数 H 表示单轴拉伸时真应力、对数应变曲线的斜率, 采用 Ramberg-Osgood 公式表示单轴拉伸时的应力、应变关系曲线, 则 H 为^[3]

$$H = \frac{d\sigma}{d\varepsilon_p} = \frac{\sigma}{m} \left(\frac{\sigma_0}{\sigma} \right)^m \quad (14)$$

式中 m 和 σ_0 为常数, 根据试验数据采用最小二乘法拟合确定。

3 有限元程序实现

3.1 有限元程序框图

主程序框图见图 1。

3.2 程序实现中的一些技巧

3.2.1 加载方式

为了便于控制, 程序中采用三种加载方式, 即荷载增量法、位移增量法和混合加载法, 其中混合加载法是前两种方法的结合, 在一次计算中既可用荷载控制, 也可用位移控制。

3.2.2 刚性端板约束

在加载过程中, 经常会碰到结构或构件的某些边界均匀移动的情况, 如在边界有较强加劲肋, 或试验中采用刚性端板加载等, 程序中采用先处理技术来实现这些位移约束条件。

3.2.3 残余应力的处理

残余应力离散到各高斯(Gauss)积分点上, 作为初始应力加入应力工作数组, 在第一次加载之前进行调平修正。

3.2.4 应力、应变关系的求解

在每次迭代获得增量位移之后, 可以计算相应的应变和应力增量, 应力增量由子增量法按下式积分计算

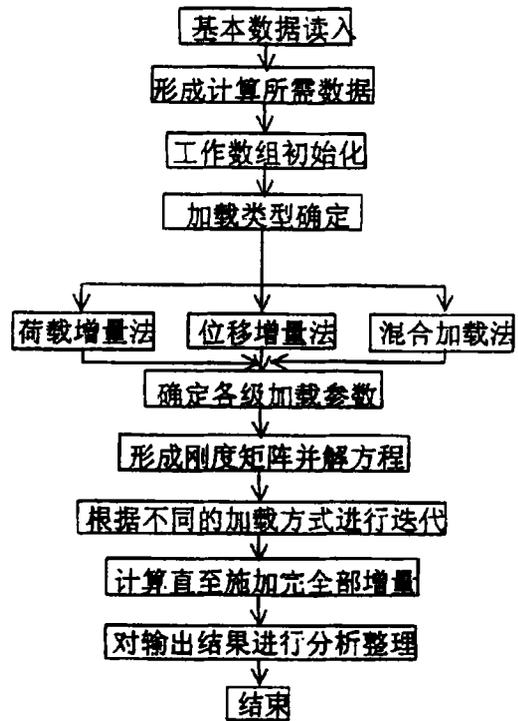


图 1 主程序计算框图

$$\{\bar{S}\}_i = \{\bar{S}\}_{i-1} + \int_{(\bar{E})}^{(\bar{E}+\Delta\bar{E}_i)} [D(S)]d(\bar{E}) \quad (15)$$

在迭代过程中,可能会由于虚假卸载而导致迭代的不收敛,根据 Nyssen^[6]提出的塑性增量可逆的概念,在每一级加载过程中,计算累积塑性应变 $\{T_p\}$,若某次累积的塑性应变 $\{T_p\}_i < \{0\}$,则认为*i*节点卸载,按弹性规律进行计算,并令 $\{T_p\} = \{0\}$ 。塑性应变表达式为:

$$\{T_p\} = \sum \{\Delta T_p\}; \quad \{\Delta T_p\} = d\lambda \sqrt{\frac{2}{3} \left\{ \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \right\}^T \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}}} \quad (16)$$

具体求解过程如下:

首先,由*i*次迭代获得的位移增量 $\{\Delta u\}_i$,转化到局部坐标下为 $\{\Delta u\}_i^*$,求局部坐标下单元各积分点局部应变 $\{\Delta \bar{E}\}_i^*$;

其次,由 $\{\Delta \bar{E}\}_i^*$ 求应力增量 $\{\Delta \bar{S}\}_i^*$;

(1)对已经进入塑性的点,假定弹性应变和塑性应变的比 $\beta = 0$,转(3);否则,假定为完全弹性,由弹性规律求 $\{\Delta \bar{S}\}_i^*$;

$$\{\Delta \bar{S}\}_i = [D]_e \{\Delta \bar{E}\}_i \quad (17)$$

现时应力为

$$\{i+\Delta\bar{S}\}_i = \{i\bar{S}\}_i + \{\Delta \bar{S}\}_i \quad (18)$$

(2)检查现时应力是否满足屈服条件,若 $f < 0$,说明弹性假设正确,转(5);否则说明该积分点为一过渡点,此次迭代是由弹性进入塑性,假设弹性应变增量部分为 $\beta\{\Delta \bar{E}\}_i$,相应弹性应力为 $\beta\{\Delta \bar{S}\}_i$,将 $\{\bar{S}\}_{i-1} + \beta\{\Delta \bar{S}\}_i$ 代入*f*表达式中,应有 $f = 0$,由此解出 β_i :

$$\beta_i = \frac{-a_2 + \sqrt{a_2^2 - a_1 a_3}}{a_1} \quad (19)$$

式中:

$$\begin{aligned} a_1 &= \Delta S_{11}^2 + \Delta S_{22}^2 - \Delta S_{11} \Delta S_{22} + 3(\Delta S_{12}^2 + \Delta S_{23}^2 + \Delta S_{31}^2) \\ a_2 &= \bar{\sigma}_x \Delta S_x + \bar{\sigma}_y \Delta S_y - \frac{1}{2}(\bar{\sigma}_x \Delta S_y + \bar{\sigma}_y \Delta S_x) + 3(\bar{\sigma}_{12} \Delta S_{12} + \bar{\sigma}_{23} \Delta S_{23} + \bar{\sigma}_{31} \Delta S_{31}) \\ a_3 &= \bar{\sigma}_{11}^2 - \bar{\sigma}_{11} \bar{\sigma}_{22} + \bar{\sigma}_{22}^2 + 3(\bar{\sigma}_{12}^2 + \bar{\sigma}_{23}^2 + \bar{\sigma}_{31}^2) - \bar{\sigma}_s^2 \end{aligned} \quad (20)$$

(3)根据塑性应变增量部分 $(1-\beta)\{\Delta \bar{E}\}_i$,计算等效应变增量 $\Delta \bar{E}_p$ (绝对值):

$$\Delta \bar{E}_p = \sqrt{\frac{2}{3} (1-\beta)^2 \{ \Delta E_{11}^2 + \Delta E_{22}^2 + (\Delta E_{11} + \Delta E_{22})^2 + \frac{1}{2} [(2\Delta E_{12})^2 + (2\Delta E_{23})^2 + (2\Delta E_{31})^2] \}} \quad (21)$$

则子增量数为

$$N_{ss} = \Delta \bar{E}_p / \varepsilon_s, \quad \varepsilon_s \text{一般取 } 0.0002 \quad (22)$$

(4)开始子增量循环,对第*m*个子增量,有:

$$\{d\bar{E}\}_m = \frac{(1-\beta)}{N_{ss}} \{\Delta \bar{E}\}_i \quad (23)$$

(a) 对第 $m-1$ 个子增量已开始弹性卸荷的点重新加载时, 按弹性规律式计算, 代入屈服函数 f 中, 若 $f < 0$, 则假定弹性正确, 转(d); 否则求 β_m , 弹性结束时的应力为:

$$\{\sigma_m\} = \{\sigma_{m-1}\} + \beta_m \{\Delta\sigma\}_m \quad (24)$$

塑性应变增量为:

$$\{d\bar{\epsilon}\}_m = \frac{(1-\beta)(1-\beta_m)}{N_s} \{\Delta\bar{\epsilon}\}_m \quad (25)$$

(b) 计算对应于塑性应变增量 $\{d\bar{\epsilon}\}_m$ 的应力增量, 并计算累积塑性应变增量, 若 $(T_p)_i < 0$, 说明本增量步内第 i 点已经开始弹性卸荷, 转(d)计算; 若 $(T_p)_i \geq 0$, 则该点仍处于塑性状态, 更新屈服点, 用二阶龙格—库塔(Runge—Kutta)方法计算应力增量并累加应力增量, 计算屈服面中心的移动量 $\{d\alpha_y\}_m$.

$$\sigma_{,m} = \sigma_{,m-1} + H(\sigma_{m-1})d\bar{\epsilon}_{,m} \quad (26)$$

$$\{d\sigma\}_m = 0.5\{[D_\sigma(\sigma_{m-1/2})] + [D_\sigma(\sigma_m)]\}\{d\bar{\epsilon}\}_m \quad (27)$$

$$\{\sigma\}_m = \{\sigma\}_{m-1} + [D_\sigma(\sigma_{m-1})]\{d\bar{\epsilon}\}_m \quad (28)$$

$$\{d\alpha_y\}_m = \frac{2}{3}H(1-M)\{d\bar{\epsilon}\}_m; \quad \{\alpha_y\}_m = \{\alpha_y\}_{m-1} + \{d\alpha_y\}_m \quad (29)$$

(c) 检查现时应力状态是否满足屈服条件, 若不满足, 需进行修正

$$\delta\lambda = \frac{F(\bar{\sigma}) - \bar{\sigma}^2}{\left(\frac{\partial F}{\partial\{\sigma\}}\right)^T [D]_s \frac{\partial F}{\partial\{\sigma\}} + \frac{2}{3}H(1-M)\left(\frac{\partial F}{\partial\{\sigma\}}\right)^T \frac{\partial F}{\partial\{\sigma\}} + 2\bar{\sigma}, HM \sqrt{\frac{2}{3}\left(\frac{\partial F}{\partial\{\sigma\}}\right)^T \frac{\partial F}{\partial\{\sigma\}}}} \quad (30)$$

式中 $\bar{\sigma}$ 为现时屈服应力, 若 $\delta\lambda > 0$, 则应力修正量如下:

$$\{\delta\bar{\sigma}\} = -\delta\lambda [D]_s \frac{\partial F}{\partial\{\sigma\}} \quad (31)$$

(d) 对于弹性卸荷的点, 子增量应力按弹性规律计算并累加到现时应力。

(5) 若 $m = N_s$, 子增量结束。

3.3 程序的使用范围

由于程序中单元模型为厚壳单元(当采用缩减积分技术时, 可用于计算薄板壳), 因此该程序可用于计算由板壳组成的各种结构构件的强度、局部稳定和极值点失稳问题, 可考虑不同的材料强化模型(弹性、理想弹塑性、等向强化、随动强化和混合强化等), 可考虑非线性大变形、大应变问题, 但不能处理分岔失稳和跃越失稳问题。

4 有效性验证

4.1 板壳屈曲问题

图 2 为一扁壳后屈曲路径, 直线边界为铰支且不可移动, 曲线边界为自由边, 承受壳体中心处集中荷载作用, 截面尺寸和材料参数如图, 图中还给出了 Crisfield^[7]解答。

4.2 应变反向加载问题

为验证本文所采用的混合强化本构模型的有效性, 图 3 给出了一厚铝环的几何尺寸和

材料特性, 图 4 给出了它在采用不同的强化参数 M 时的计算结果。图中还给出了 Axelsson 和 Samuelsson^[3] 的计算结果以及 Owen^[4] 等人的试验结果。

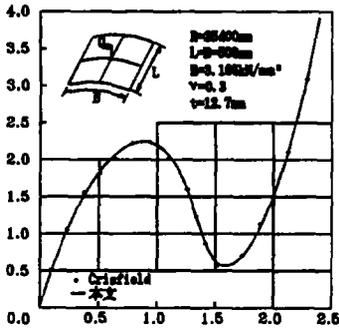


图 2 扁壳后屈曲路径

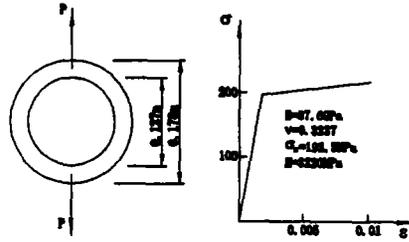


图 3 厚铝环的几何尺寸和材料特性

4.3 箱形截面短柱的循环加载问题

本文还计算了箱形截面短柱受单轴拉压循环荷载作用时滞回性能, 并与 Fukumoto 和 Kusama^[5] 的试验进行了比较。图 5、图 6、图 7 分别为试件 p40、p60、p80 的平均应力—应变滞回曲线, 其中(a)为计算曲线, (b)为试验曲线。由于材料为软钢, 有较长的屈服平台, 等向强化不明显, 在计算时取 $M=0.0$ 与试验吻合较好。

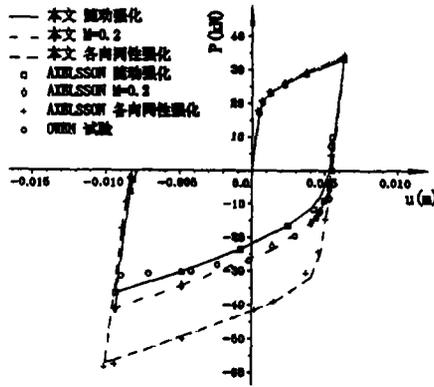


图 4 M 取不同值时的荷载—位移曲线

5 结论

由以上的分析比较可知, 本文程序 DNSFEM 对于大变形问题、屈曲问题、应变反向加载问题及循环加载等问题都有较高的精度, 可以有效地用于模拟地震作用的循环荷载的钢结构滞回性能的研究。

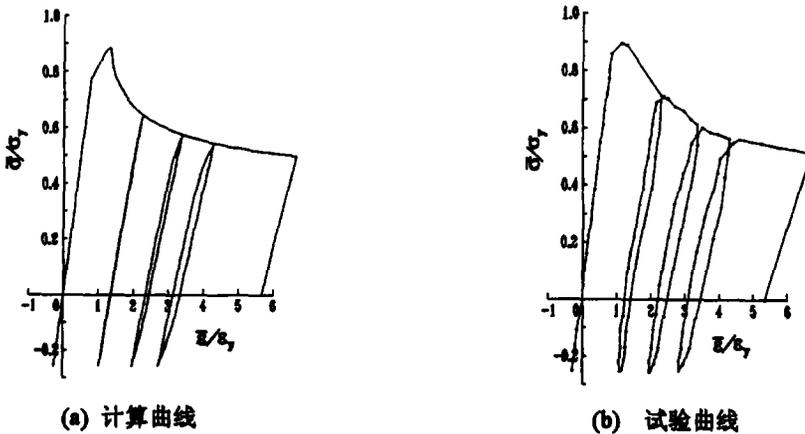


图 5 p40 平均应力—应变滞回曲线

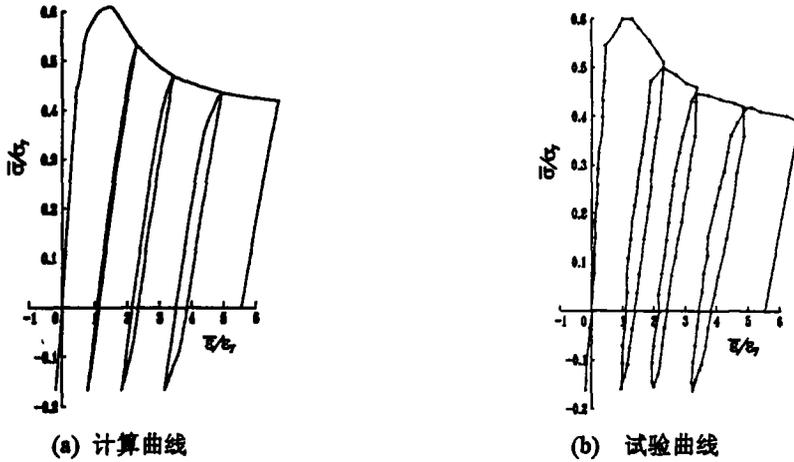


图 6 p60 平均应力—应变滞回曲线

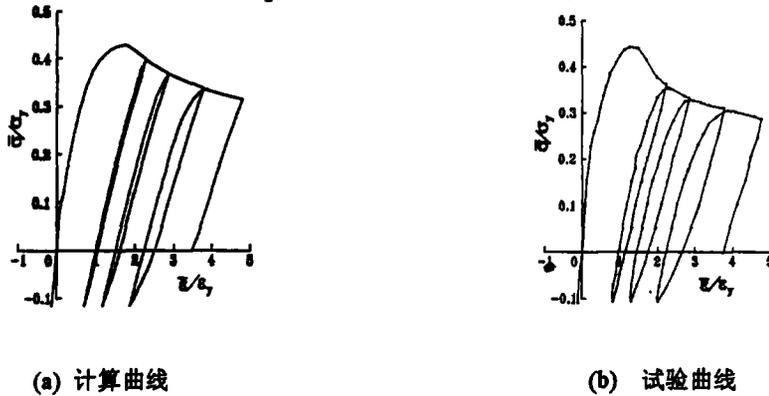


图 7 p80 平均应力—应变滞回曲线

参考文献:

- [1] 苏明周. 箱形截面钢构件在地震作用下的相关屈曲破坏机理及抗震设计对策[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 1999.
- [2] 董永涛. 单向荷载和循环荷载作用下钢板件及板组的屈曲后性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨建筑大学, 1995.
- [3] K. Axelsson & A. Samuelsson. Finite element analysis of elastic — plastic materials displaying mixed hardening[J]. *Int. J. Num. Meth. in Engng.*, 1979, 14: 211-215.
- [4] W Prager. A new method of analyzing stresses and strains in work hardening solids[J]. *J. Appl. Mech. Trans. ASME*, 1956, 23: 493-496.
- [5] 苏明周、喻岩. 建筑用钢材单向拉伸的非线性应力、应变关系[J]. *西安建筑科技大学学报*, 1999, 31(1): 25~28.
- [6] C Nyssen. An efficient and accurate iterative method, allowing large incremental steps, to solve elasto-plastic problems[J]. *Comp. & Struct.*, 1981, 13: 63-71.
- [7] M A Crisfield. Accelerating and damping the modified Newton — Raphson method[J]. *Comp. & Struct.*,

1984, 8(3): 359-407.

- [8] D R J Owen, A Prakash & O C Zienkiewicz. Finite element analysis of non-linear composite materials by use of overlay system[J]. *Comp. & Struct.*, 1974, 4: 1251-1267.
- [9] Y Fukumoto and H Kusama. Local instability tests of plate elements under cyclic uniaxial loading[J]. *J. of Struct. Engng., ASCE*, 1985, 111(5): 1051-1067.

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF STEEL MEMBERS UNDER CYCLIC LOADING

SU Ming-zhou, GU Qiang, SHEN Lin

(Inst. of civil engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an, 710055)

Abstract: The present research work aims at simulating the hysteresis behavior of steel members under the action of earthquake and wind. An algorithm is developed in which a degenerated shell element is used to study the steel members under cyclic loads based on the Updated Lagrange Method. By comparing the numerical results with other available solutions, it is found that the present algorithm offers accurate results and can be used to study the hysteresis behavior of steel plates and shells and even their composites under cyclic loads.

Key words: mixed hardening; cyclic loading; geometric and material nonlinear finite shell element

(上接 088 页)

RELIABILITY THEORY OF STRUCTURAL SYSTEM: ADVANCE AND REVIEW

DONG Cong

(Key Laboratory of Structural Engineering and Vibration, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: In the present paper, a brief introduction is made on the developing history and related research achievements of the reliability theory of structural system. Emphasis is laid on analyzing and discussing those famous classical contributions in this area. It is found that there exists close relationship among the available methods. A unified algorithm for identifying significant failure modes of structural systems is established.

Key words: system reliability; significant failure modes; branch-and-bound method; unified algorithm